

## 第四章 X 射线光学元件

### 4. 1 X 射线光路和光学元件

#### 1. 同步辐射 X 射线光束线

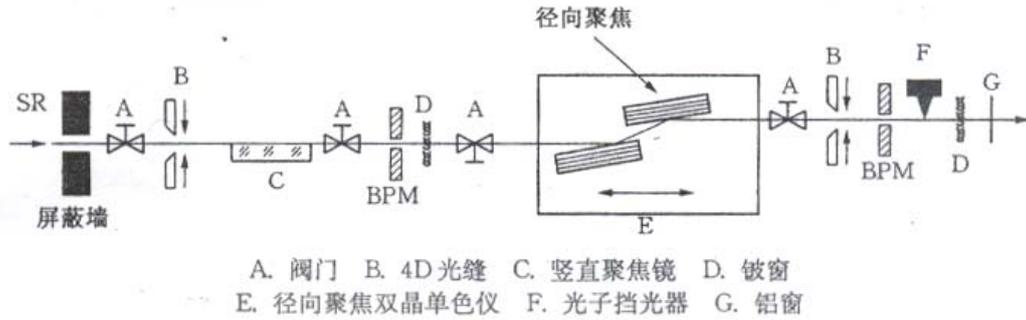


图4.1 XAFS光束线示意图

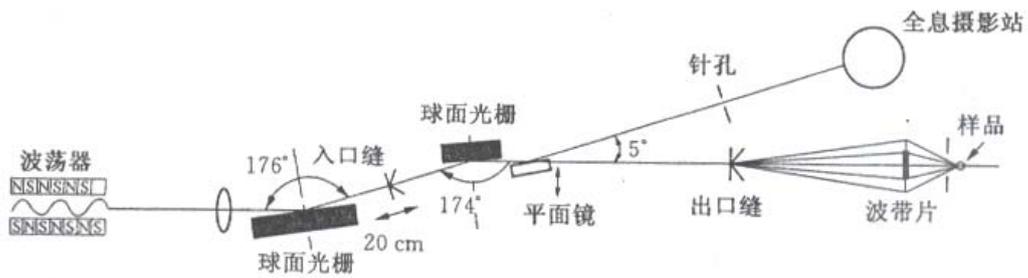


图4.2 软X射线显微与全息摄影光束线

整个光束线处于高真空腔和管道中

#### 2. 常规实验室 X 射线通常在空气中，必要时充氦气

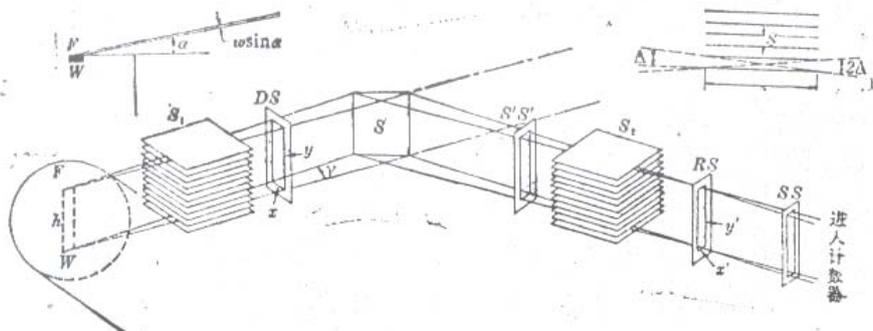


图4.3 X射线衍射仪光路

#### 3. 重要光学元件

透光元件：Be 窗，金刚石薄膜

准直器：狭缝，soller 狭缝，平行光管

聚焦元件：全反射镜，K-B 镜，弯曲晶片，X 射线透镜（X 射线聚束），  
复合折射透镜，波带片

单色器：晶体单色器，波带片，光栅，多层膜，多层膜光栅，多层膜波  
带片

#### 4. 2 X 射线晶体单色器

在硬 X 射线波段，通常用单晶将 X 射线单色化

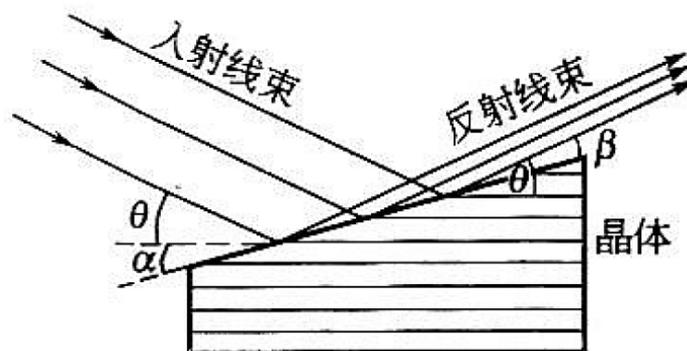
##### 1. 常用晶体

大块镶嵌晶体 LiF, NaCl, 热解石墨 发射度  $\Delta\theta_c \approx 0.2^\circ (\approx 4 \times 10^{-3})$

大块完整晶体 Si, Ge 发射度  $\Delta\theta_c \approx 10'' (\approx 5 \times 10^{-5})$

##### 2. 平面晶体单色器

双晶平行平面单色器



(a)



(b)

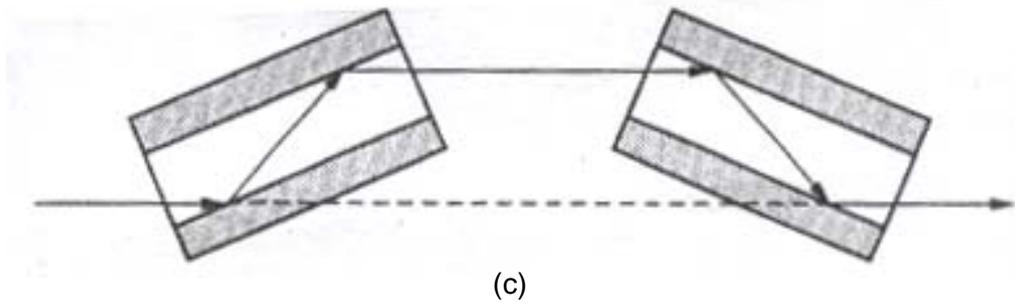


图4.4平面晶体单色器

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad \text{高次谐波问题}$$

$$\Delta \lambda = 2d \cos \theta \Delta \theta$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \text{ctg} \theta \Delta \theta, \quad \Delta \theta = [\Delta \theta_c^2 + \Delta \theta_r^2]^{1/2}$$

$\Delta \theta_c$  晶体发散度,  $\Delta \theta_r$  光束发散度

### 3. 曲面（柱面）晶体单色器

聚焦条件：罗兰聚焦圆，Bragg 定律

Johann 法：罗兰圆半径  $R$ ，曲面曲率半径  $2R$ ，晶面与晶体表面平行，晶体表面与罗兰圆相切

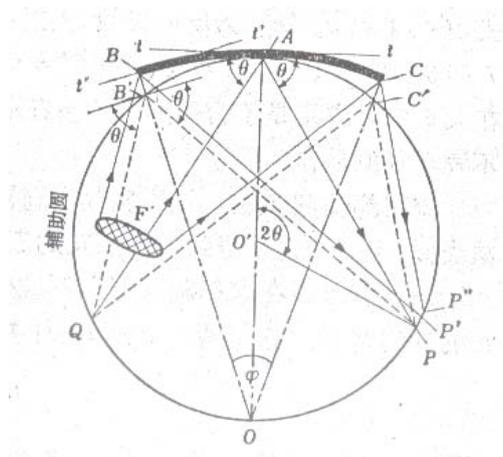


图4.5约翰法的聚焦原理

Johansson 法：罗兰圆半径  $R$ ，曲面曲率半径  $2R$ ，晶体表面磨成半径为  $R$  的凹面，与罗兰圆上一段重合

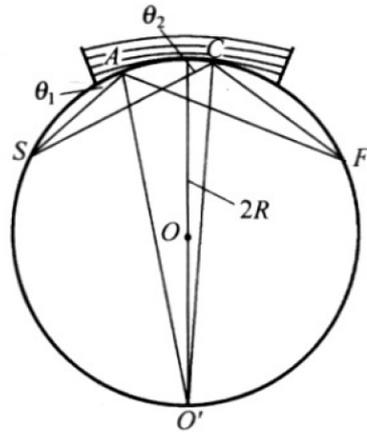


图4.6 Johansson法的聚焦原理

#### 4. 多层膜

轻重元素周期性多层膜: Mo/Si, W/C, Rh/C,  $d = d_1 + d_2$

适用于软 X 射线波段, 能量分辨率  $\frac{\Delta E}{E}$  ( $5 \sim 20\%$ ), 可用于大角度反射 (衍射), 反射能力强, 可作为反射聚焦元件与单色元件。

轻重元素多层膜厚度比  $d_1/d_2$  的适当变化, 可消除高次谐波及提高能量分辨本领

#### 4.3 波带片

##### 1. 菲涅尔波带片

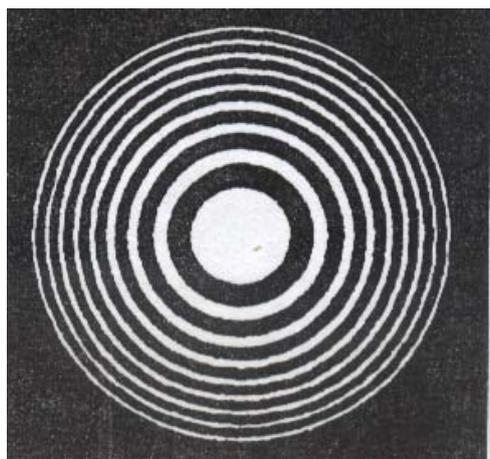


图4.7 菲涅尔波带片

##### 2. 制备

用电子束在金箔上刻蚀

### 3. 波带片的聚焦与单色化

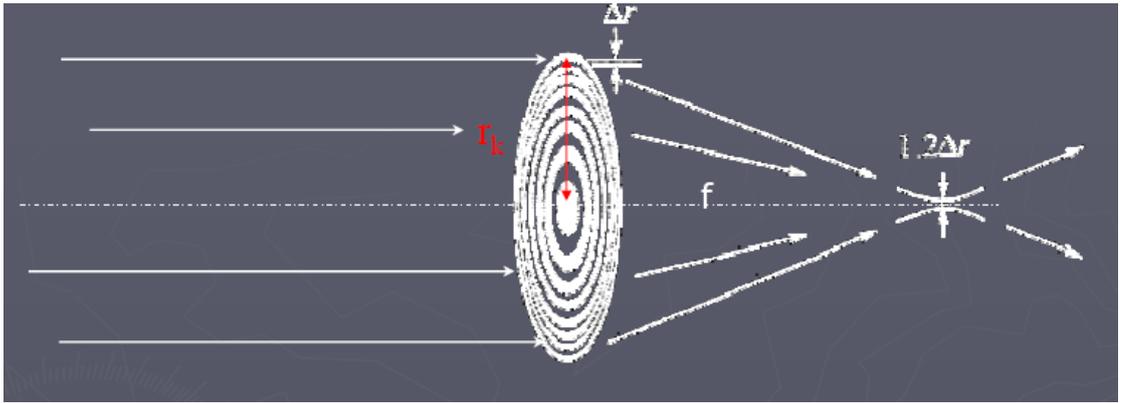


图4.8 X射线波带片

$$r_k = \sqrt{kf\lambda}$$

$K$ : 波带片中环带的级数 (从中心开始,  $K=0$  算起)

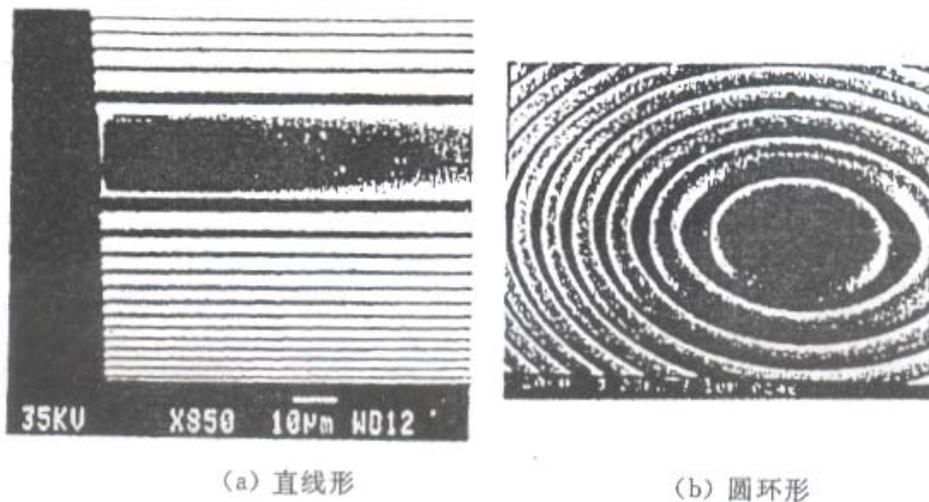
$r_k$ :  $K$  带环的半径

$f$ : 焦距

平行单色光入射, 聚焦在焦点

平行白光入射, 不同波长的聚焦点在轴线上展开

### 4. 布拉格-菲涅尔透镜 (Bragg-Fresnel lens, BFL)



(a) 直线形

(b) 圆环形

图4.9 布拉格-菲涅尔透镜照片

### 4. 4 光栅

软 X 射线单色器：结构、原理与可见光光栅相同，但刻线密度要比可见光光栅高得多

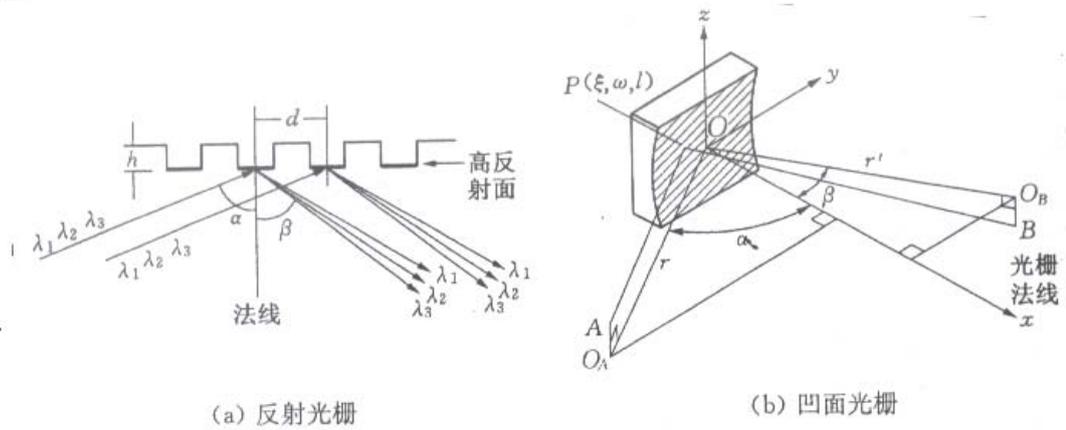


图4.10 软X射线光栅

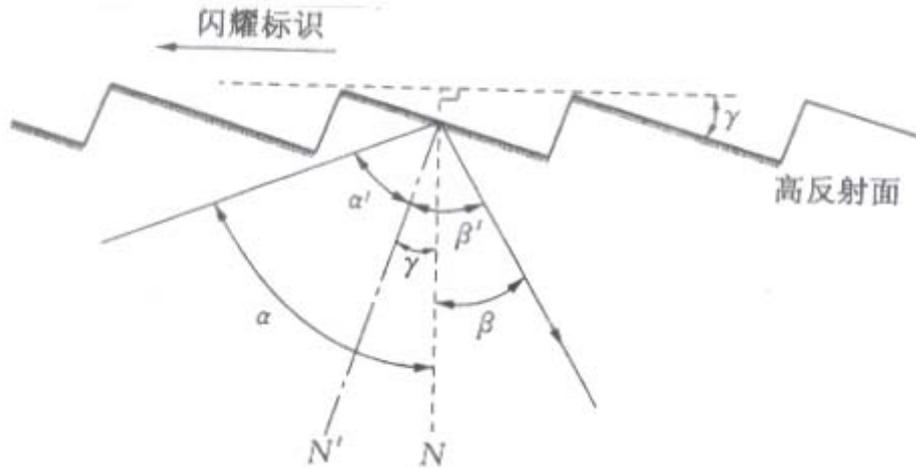


图4.11 闪耀光栅原理

形成衍射极大的条件

$$\text{反射光栅: } d(\sin \alpha + \sin \beta) = k\lambda$$

$$\text{闪烁光栅: } d(\sin \alpha - \sin \beta) = 2d \sin \gamma \cos(\gamma + \beta) = k\lambda$$

多层膜光栅

#### 4. 5 全反射镜，全反射聚焦镜

##### 1. X 射线的全发射，全反射的临界角

$$n = 1 - \delta, \quad \delta = \frac{Ne^2\lambda^2}{8\pi^2\epsilon_0 mc^2} \quad N \text{ 为单位体积中电子的数目}$$

单色 X 射线从真空（或空气）中掠入射至媒质时，发生全反射的临界角  $\theta_c$  为

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} = \frac{e\lambda}{2\pi c} \cdot \left(\frac{N}{\epsilon_0 m}\right)^{1/2}$$

当白光 X 射线从真空（或空气）中以  $\theta$  角掠入射至媒质，全反射光束的截止波长为

$$\lambda_c = \left(\frac{\epsilon_0 m}{N}\right)^{1/2} \cdot \frac{2\pi c \theta}{e}$$

## 2. K-B 镜（Kirkpatrick-Baez）镜

相互垂直放置的柱面金属镀层反射镜，将 X 射线束垂直与水平两个方向聚焦

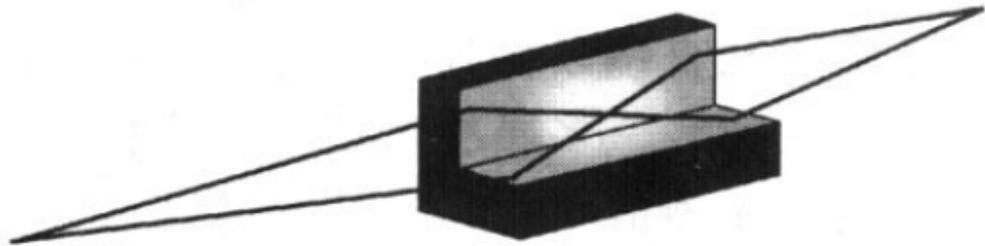


图4.12 边靠边的Kirkpatrick-Baez系统

## 3. X 射线透镜（X 射线聚束器）

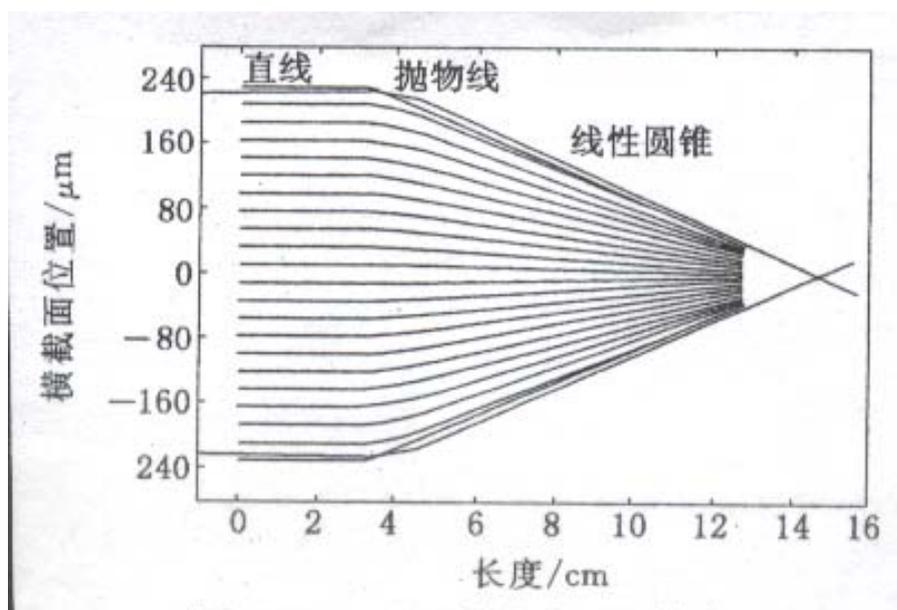


图4.13 毛细管簇截面图

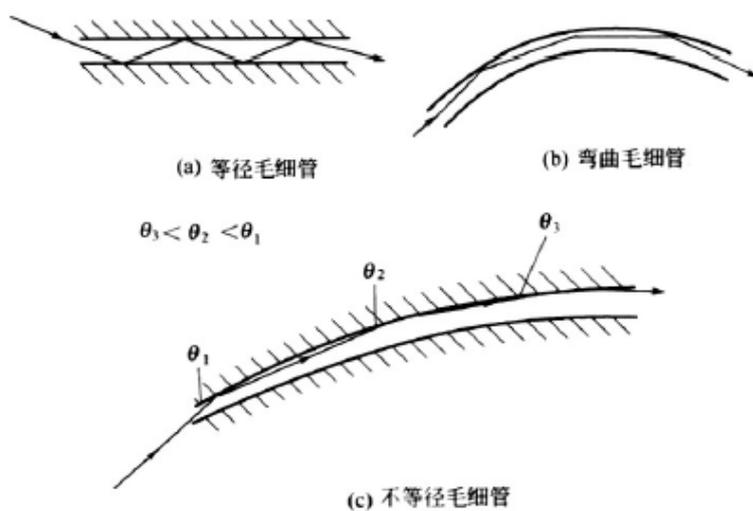


图4.14 毛细管

内壁光滑的玻璃毛细管作为 X 射线导管，X 射线在导管内产生多次全反射，从而由光导管的一段传至另一端，并随导管的弯曲而改变传播方向，导管的弯角可以大大超过全反射临界角。

有成千上万根 X 射线导管组成的 X 射线透镜（X 射线聚束器）可以在  $\pm 30^\circ$  范围内收集 X 射线，并将 X 射线束变为会聚束或准平行束。

#### 4. 6 复合透镜

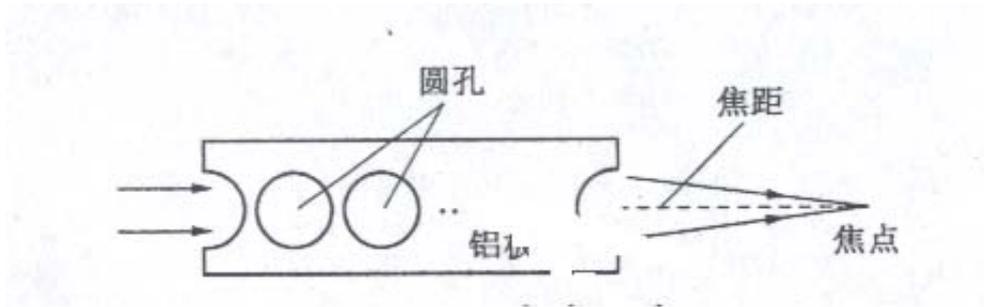


图4.15复合透镜

在铝板或有机材料上打一排小孔，如图所示，组成复合透镜，已用于 X 射线微光束聚焦。

## §4.7 X 射线成像技术及其应用

### 1. 吸收(振幅)衬度, 相位衬度 图 1

$$n=1-(\alpha+i\beta)=(1-\alpha)+i\beta$$

### 2. 二维透射像, 三维重构像(CT)

### 3. 多波长成像与元素分布图

### 4. X 射线显微术

水窗口: 由氧的 K 吸收边及碳的 K 吸收边可知, 在软 X 射线波段的 2.3nm 至 4.4nm 区间, 氧(主要来自水)的吸收系数远小于碳, 这个对水透明的波长区间被称为“水窗” 图 2

软 X 射线接触显微成像 图 3

软 X 射线扫描显微术 图 4

软 X 射线全息显微术 图 5

透射式 X 射线显微镜 图 6

X 射线衍射显微术, 单粒子相干 X 射线衍射成像

### 5. X 射线光刻技术

软 X 射线光刻

硬 X 射线深度光刻 LIGA 技术

### 6. X 射线无损探伤技术

### 7. X 射线天文望远镜

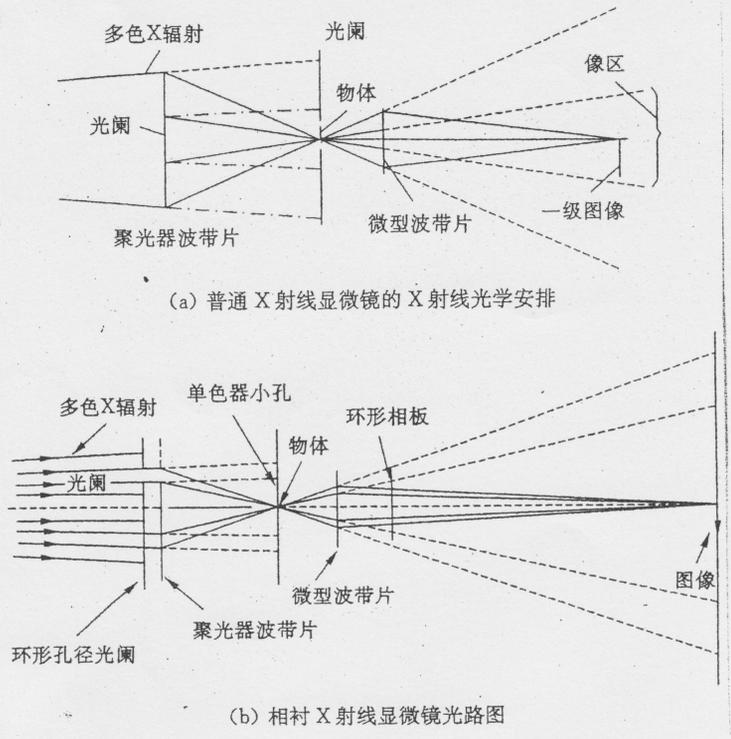


图 1

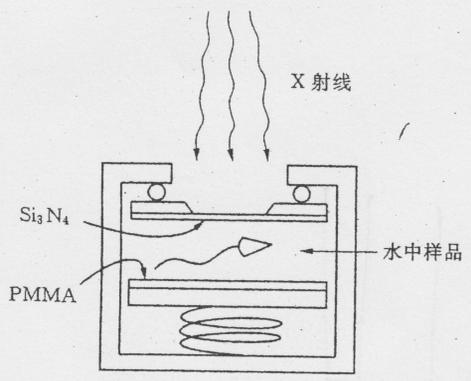


图 9-10 厚 0.1  $\mu\text{m}$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜作 X 射线窗片, 样品室内部为 1 atm (1 atm = 101.325 kPa) 的样品环境, 室外为真空。  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜能维持上述室内外之间的压强差。 PMMA 薄层的厚度为 0.5  $\mu\text{m}$ , 置于一硅薄片上,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜与光刻胶之间的距离是 3  $\mu\text{m}$

引自 Tomie T, et al. Science. 1991, 252:691~693

图 3

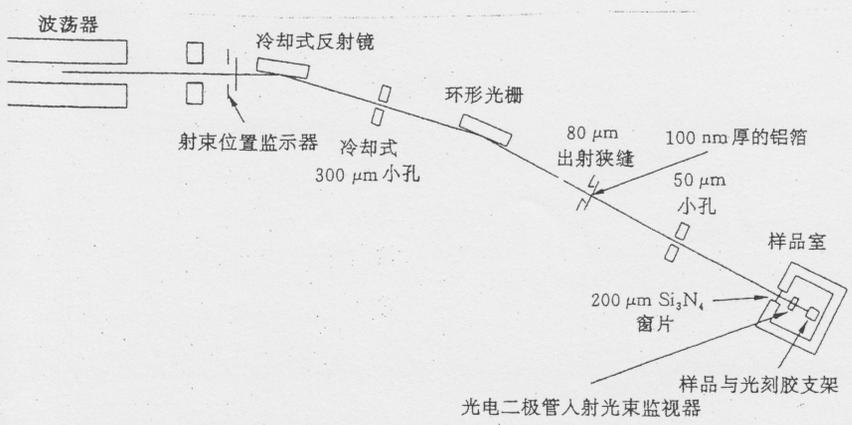


图 5 NSLS X-17t 波荡器光束线用于记录 Gabor X 射线全息图

引自 Jacobsen C, Howells M, Kirz J, et al. J Opt Soc Am A. 1990, 7(10): 1847~1861

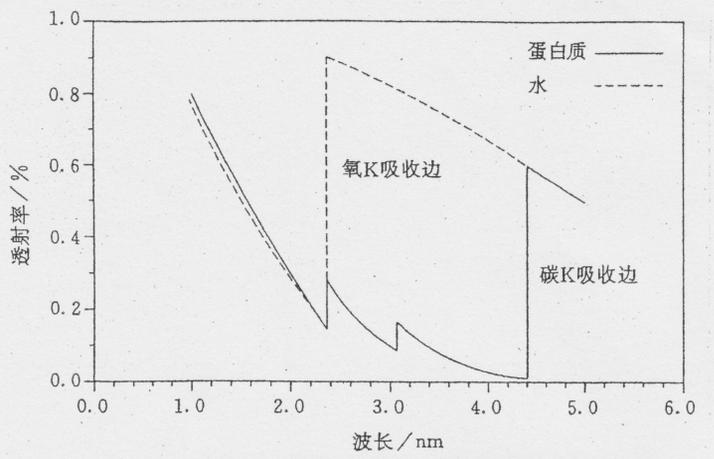


图 2 在水窗区 1  $\mu\text{m}$  厚的蛋白质及水的吸收

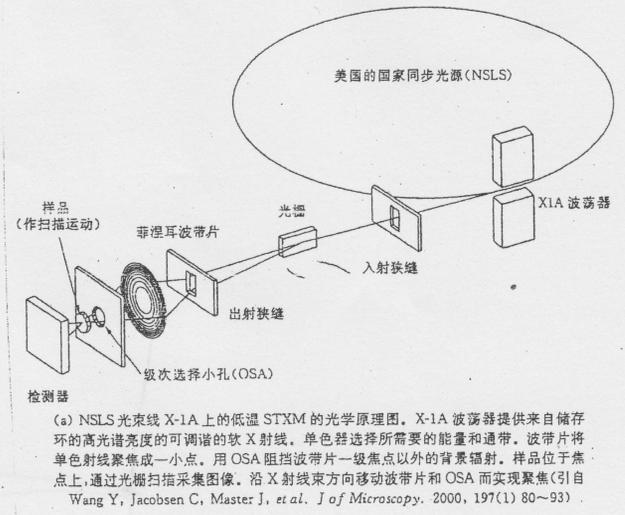


图 4

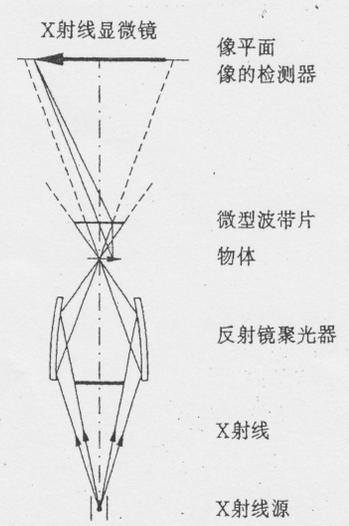


图 6 透射式 (全场) X 射线显微镜的原理